



Ótica e Relatividade

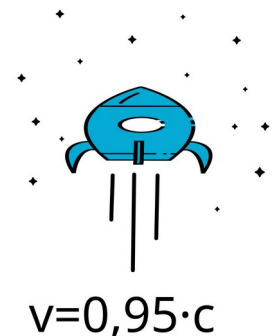
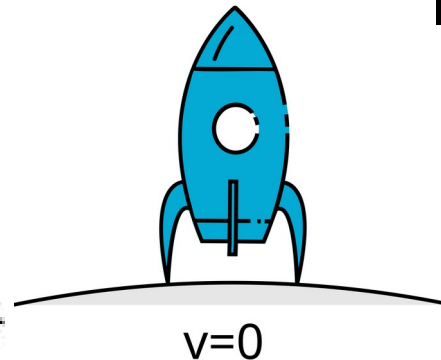
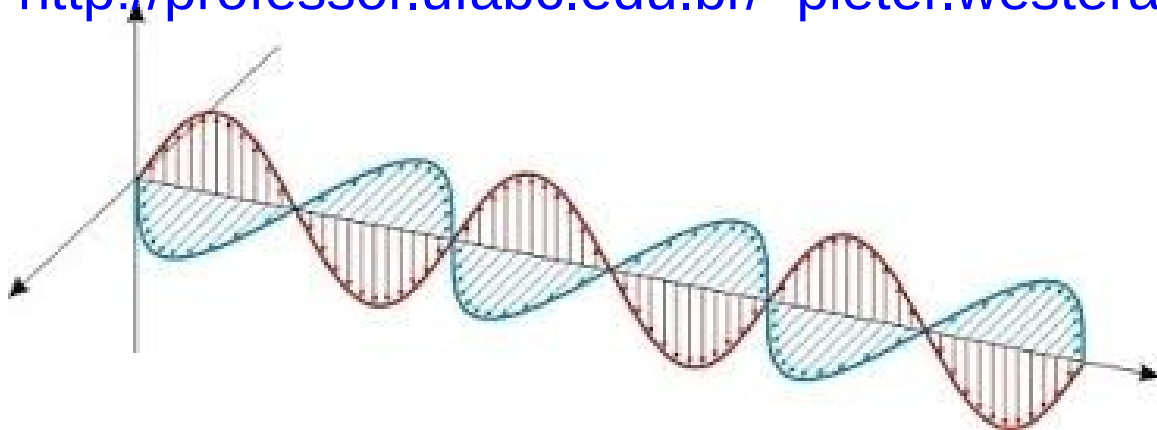
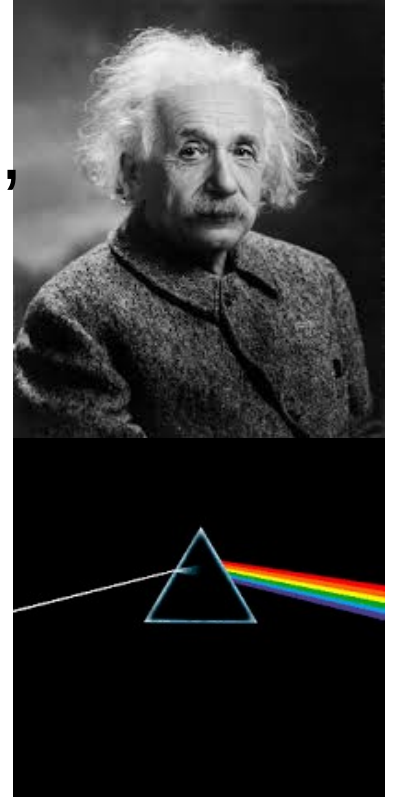
Universidade Federal do ABC

02. Ótica Geométrica, Reflexão e Refração, Princípio de Fermat da Luz, Reflexão Total, Formação de Imagens em Espelhos Planos

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/OtRel.html>



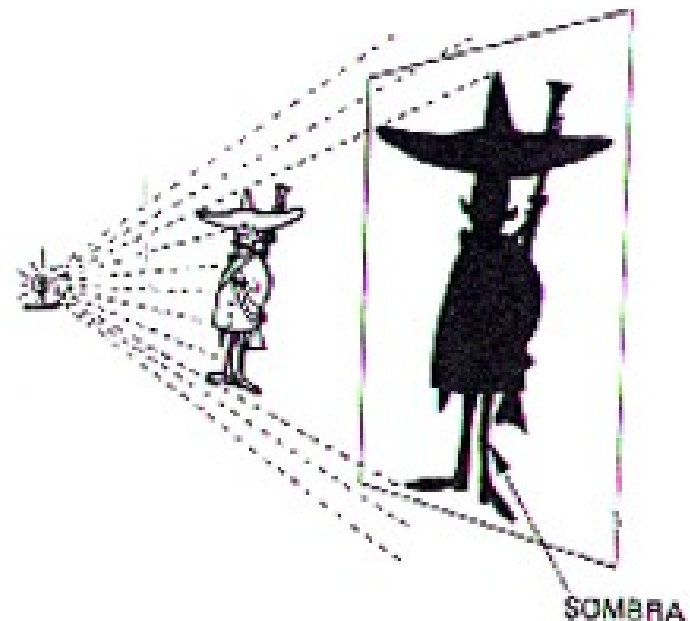
Ótica Geométrica

Descreve a **luz** em termos de **raios**, útil para discussão sobre **reflexão** e **refração** em **materiais transparentes** e **translúcidos**, **cálculos de propagação** e de **formação de imagens**.

Estes raios têm **trajetórias** bem **definidas**:

- se propagam em **linha reta** em **meios homogêneos**
- formam **sombras** bem **definidas**

Elas consistem de **partículas** ou de **ondas**?



Ótica Geométrica

A hipótese **partículas** consegue **explicar** bem estas **propriedades** (Partículas se propagam mesmo em linha reta, quando a força resultante agindo neles é nula.).

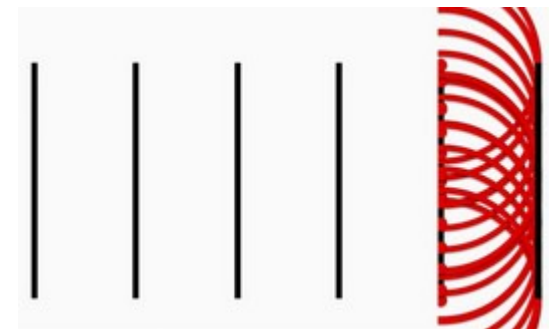
E **ondas**?

Princípio de Huygens:

Cada **ponto** de uma **frente** de **onda** comporta-se como **fonte puntiforme**, gerando **ondas secundárias**.

A frente de onda no **instante posterior** é a **envoltória** dessas **ondas secundárias**.

Assim, **ondas também** podem se propagar em **linha reta** ...

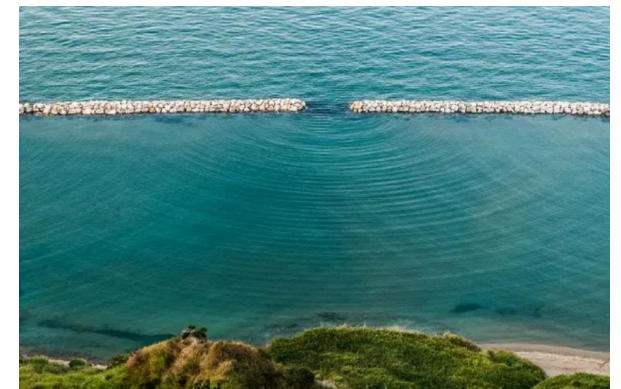
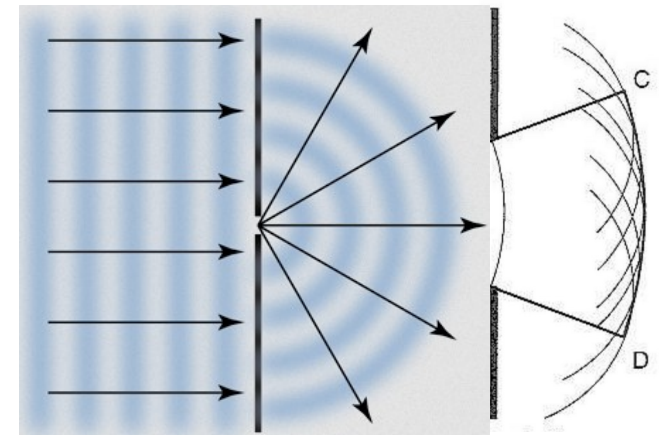
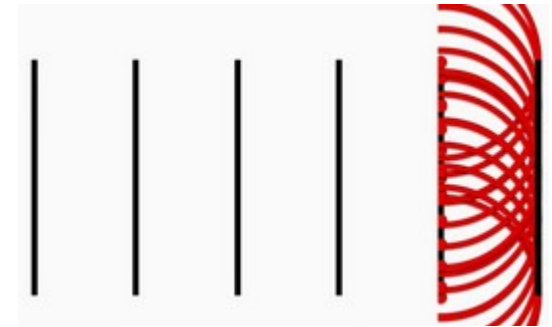


Ótica Geométrica

Ondas podem se propagar em linha reta ...

... desde que não **entrentam** nada (obstáculos, aberturas) da ordem do **tamanho** dos seus **comprimentos de onda** no caminho.

Ótica Geométrica é uma **aproximação adequada** quando **dimensões** do problema são **muito maiores** que o **comprimento de onda**, no caso da **luz visível**, 400 a 700 nm.



Reflexão e Refração

Reflexão

O raio bate numa **superfície refletora**, ele é **espelhado** de volta pro **meio**, daquele ele **veio**.

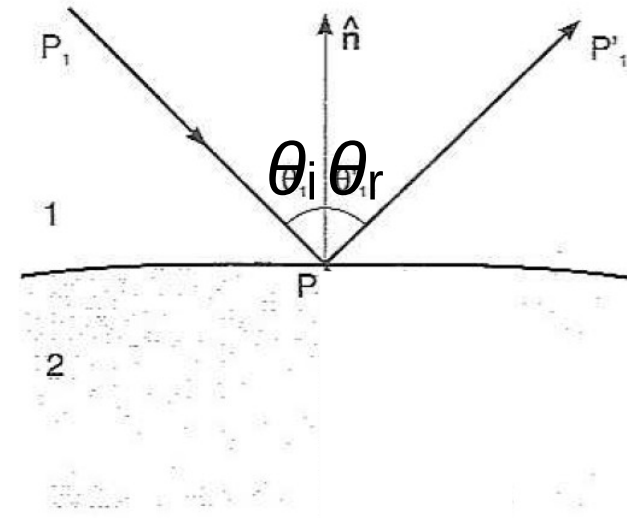
Def.

θ_i : **ângulo incidente**

(ângulo entre o **raio incidente** e a **normal** à **superfície** entre os dois meios)

θ_r : **ângulo refletido** (" raio refletido ")

Na reflexão vale (**lei da reflexão**) $\theta_i = \theta_r$

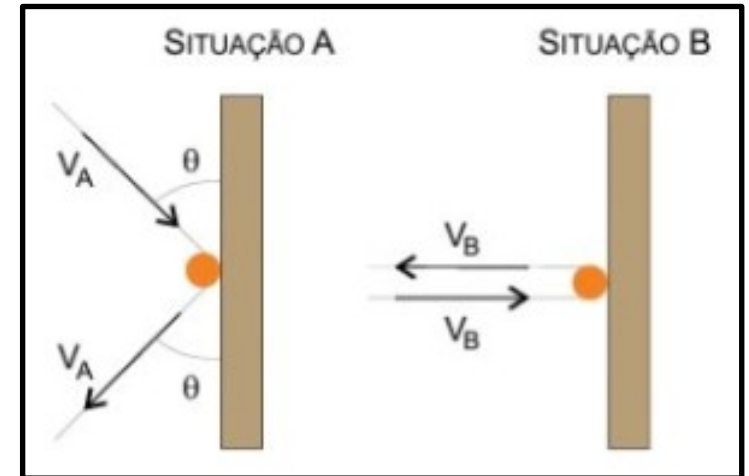


Reflexão e Refração

Reflexão

Isto pode ser explicado pela hipótese **partículas**?

Já que a **força** do espelho (parede) sobre a partícula deve ser **perpendicular à superfície**, a **componente paralela** do movimento da partícula é **conservada**, e a **perpendicular muda de sentido**.



Assim, os **ângulos** devem ser **iguais**.

=> Sim, os raios de luz consistindo de **partículas** consegue explicar a **lei da reflexão**.

Reflexão e Refração

Reflexão

E a hipótese **ondas**?

Frente da **onda incidente**: QP_1
" da **onda refletida**: Q'_1P

$$d := \overline{P_1P}$$

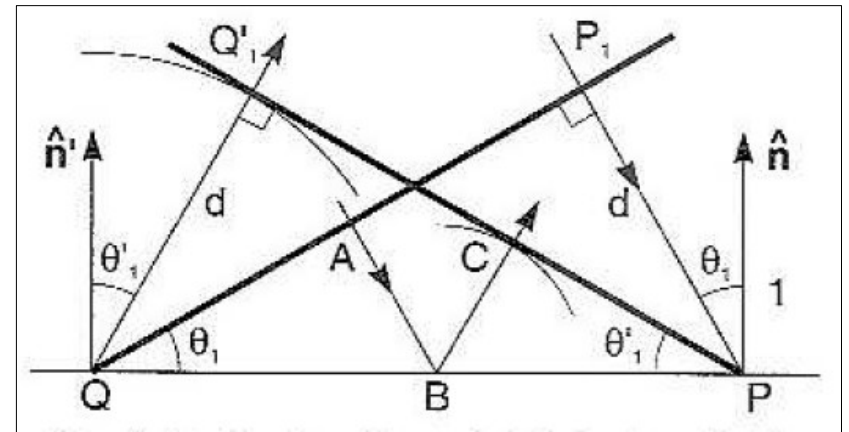
Enquanto o raio incidente se propagou de P_1 para P ,

o refletido foi de Q para $Q'_1 \Rightarrow \overline{QQ'_1} = \overline{P_1P} = d$

\Rightarrow o triângulo QP_1P é PQ'_1Q "espelhado".

$$\Rightarrow \theta_1 = \theta'_1$$

\Rightarrow Os raios de luz consistindo de **ondas também** consegue **explicar a lei da reflexão**.



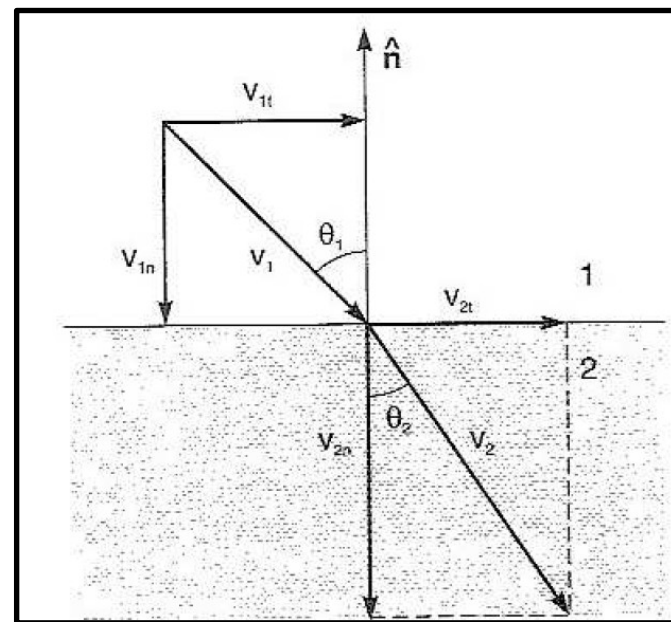
Reflexão e Refração

Refração

O raio bate numa **superfície** entre **dois meios transparentes**, e **passa do meio 1 pro meio 2**.

Neste processo, a **razão** entre os **senos dos ângulos incidente**, θ_1 , e **de refração**, θ_2 , é **sempre igual** (pro **mesmo par de meios**, por exemplo ar e água):

$$\frac{\text{sen } \theta_1}{\text{sen } \theta_2} = n_{12}$$



Reflexão e Refração

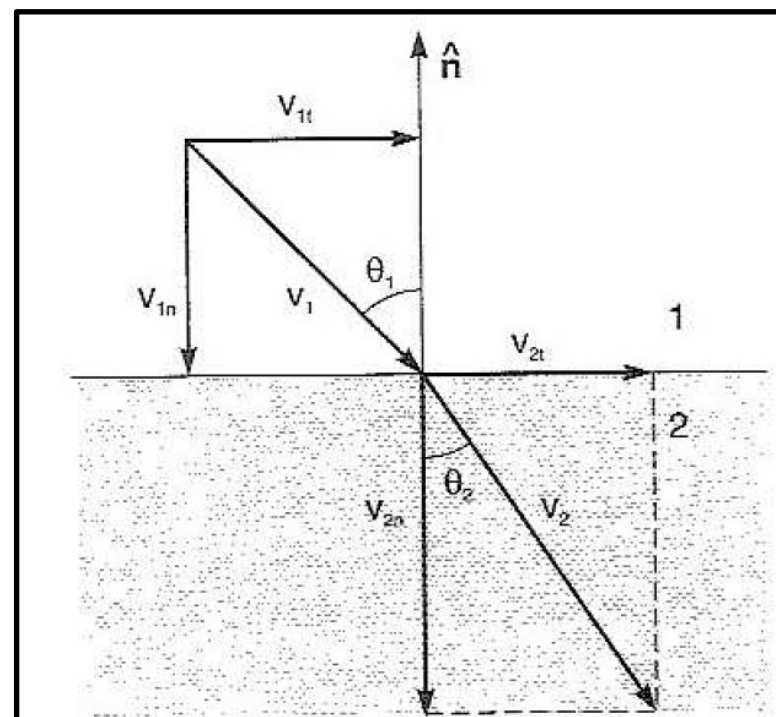
Refração

A hipótese **partículas** consegue explicar isto?

Supondo de novo que a **força** sobre a partícula é **perpendicular** à superfície entre os dois meios, a **componente paralela** v_t de novo é **conservada**, mas a **perpendicular muda** (neste caso aumenta).

$$v_{2t} = v_2 \sin \theta_2 = v_{1t} = v_1 \sin \theta_1$$
$$\Rightarrow \sin \theta_1 / \sin \theta_2 = v_2 / v_1$$

\Rightarrow Os raios de luz consistindo de **partículas** consegue explicar a **lei da refração**, se a **velocidade** da luz na **água** for **maior** que a no **ar**.



Reflexão e Refração

Refração

E a hipótese **ondas**?

Frente de **onda incidente**: QP_1

" da **onda refratada**: Q_2P

$$d_1 := \overline{P_1P} = \overline{PQ} \text{sen } \theta_1,$$

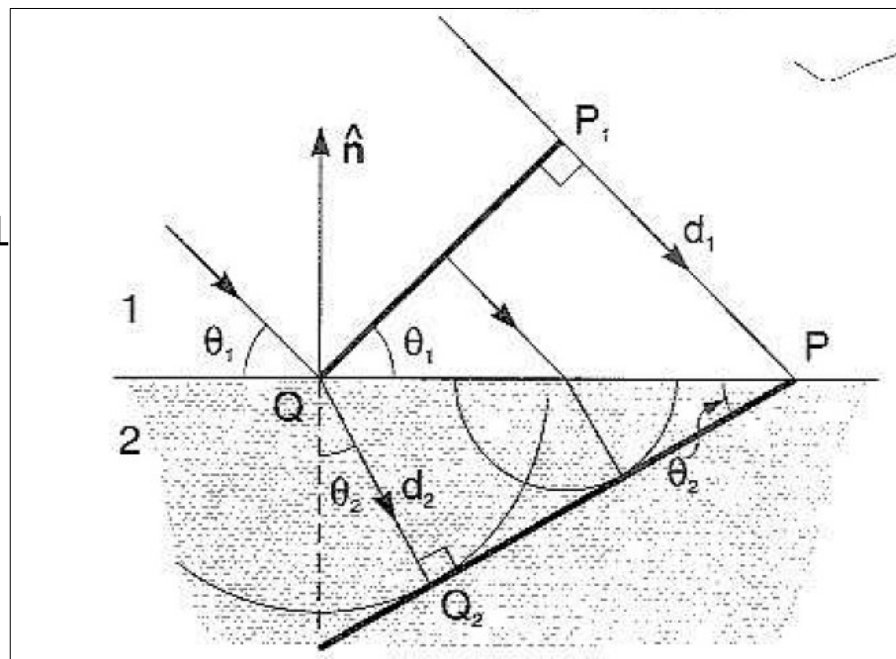
$$d_2 := \overline{QQ_2} = \overline{PQ} \text{sen } \theta_2$$

Enquanto o raio incidente se propagou de P_1 para P ,

o refratado foi de Q para $Q_2 \Rightarrow d_1/v_1 = d_2/v_2$

$$\Rightarrow d_1/d_2 = \text{sen } \theta_1/\text{sen } \theta_2 = v_1/v_2$$

\Rightarrow Os raios de luz consistindo de **ondas** consegue explicar a **lei da refração**, se a **velocidade** da **luz** na **água** for **menor** que no **ar**.



Reflexão e Refração

Resumo

Raios de **luz** são:

- feixes de **partículas**, se a **velocidade** da **luz** for **maior** na **água** que no ar
- **ondas**, se a velocidade da luz for **maior** no **ar** que na **água**

Em 1850, **Fizeau** e **Foucault** mediram as duas velocidades, e mostraram que a na **água** é **menor**, tal que, de lá até o início do século XX, o **modelo ondulatório** da **luz** foi o **vencedor** (e ainda hoje funciona muito bem em muitas aplicações.)



Fizeau e Foucault

Reflexão e Refração

Refração

Ainda sobre a lei da refração:

Podemos escrever

$$n_{12} = \frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{v_1}{v_2}$$

como n_2/n_1 ,

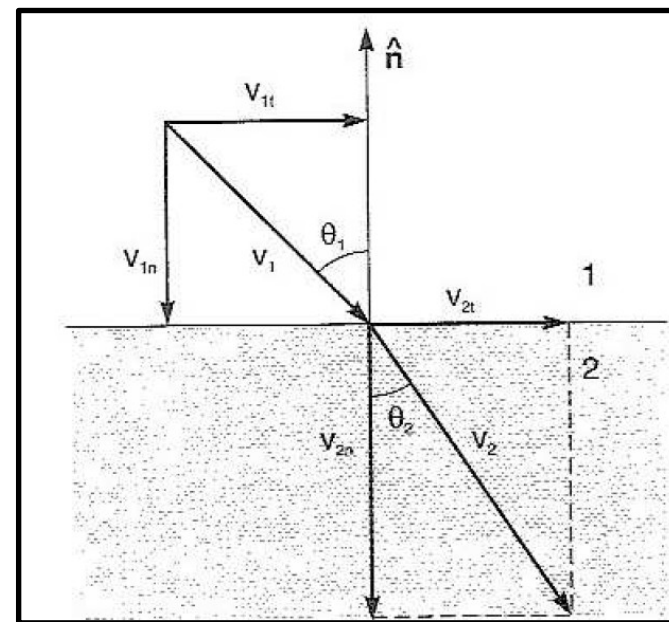
onde n_1 e n_2 são chamados de

índices de refração ou **refratórios**

dos meios 1 e 2.

=> **Lei de Snell**: $n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2$

Também vale, se o raio passa do meio com índice refratário maior pro menor (da água pro ar).



Reflexão e Refração

Refração

A **velocidade** da **luz** é o **mais alto** no **vácuo**, e definimos $n_{\text{vácuo}} = 1$. Assim, para qualquer meio $n \geq 1$, e a **velocidade** da **luz no meio** é $c_n = c/n$, onde c é a velocidade da luz no vácuo = $2.9979 \cdot 10^8$ m/s

Alguns Valores de Índices de Refração

Meio	n
vácuo	1
ar	$1.000273 \approx 1$
água	1.333
vidro	~ 1.5

!!! Estes valores dependem ligeiramente de temperatura e pressão, e mais fortemente do comprimento de onda da luz (tirando no caso do vácuo). Voltaremos nisto.

Reflexão e Refração

O Princípio de Fermat

"De **todos** os **caminhos possíveis** para ir de **um ponto** a **outro**, a **luz sempre** segue aquele que é percorrido no **mínimo tempo**" (princípio do mínimo tempo)

É um exemplo de um **princípio variacional**, que afirma que, **variando** "todos os **parâmetros**" (no caso, as posições ao longo do caminho da luz), a **combinação** de **parâmetros** (o caminho) que se **realiza**, é aquela que **minimiza** (às vezes maximiza), alguma **grandeza** (no caso, o tempo de percurso).

Princípios variacionais existem em **várias áreas** da física e podem ser muito úteis e oferecer **métodos alternativos** para achar **soluções** ou até para **interpretar** a física.

Reflexão e Refração

O Princípio de Fermat

Entre parênteses: **Exemplos de Princípios Variacionais**

Na **Mecânica Lagrangeana**, em lugar de acompanhar o movimento de partícula(s) "ponto a ponto" usando a 2ª lei de Newton, se encontra a **trajetória** de uma partícula ou de um conjunto de partículas **minimizando** uma grandeza chamada "**ação**"
(=> disciplina Mecânica Clássica II).

Para achar os **pesos** de **orbitais atômicos** compondo **orbitais moleculares**, se **minimiza** a **energia total** da **molécula** (=> Interações Atômicas e Moleculares).

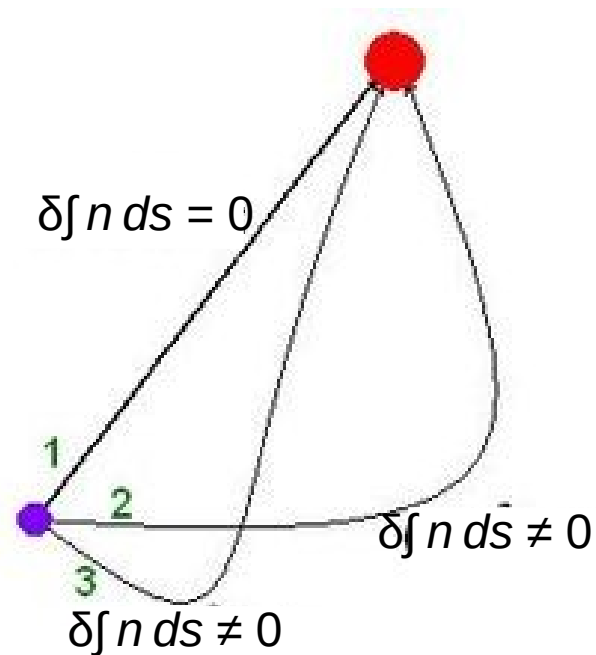
Reflexão e Refração

O Princípio de Fermat

Voltando à **luz**: Na prática, em lugar de minimizar o tempo de percurso, se minimiza o **caminho ótico** $\int n ds$ (dá no mesmo, já que $t = \int ds/c_n = \int n/c ds \propto \int n ds$).

$$\Rightarrow \delta \int n ds = 0$$

Dentro de um **meio homogêneo** com índice refratário n , obviamente o **caminho** que **minimiza** o **caminho ótico** é a **linha reta**, e este caminho ótico é $n \cdot$ **comprimento da linha**.



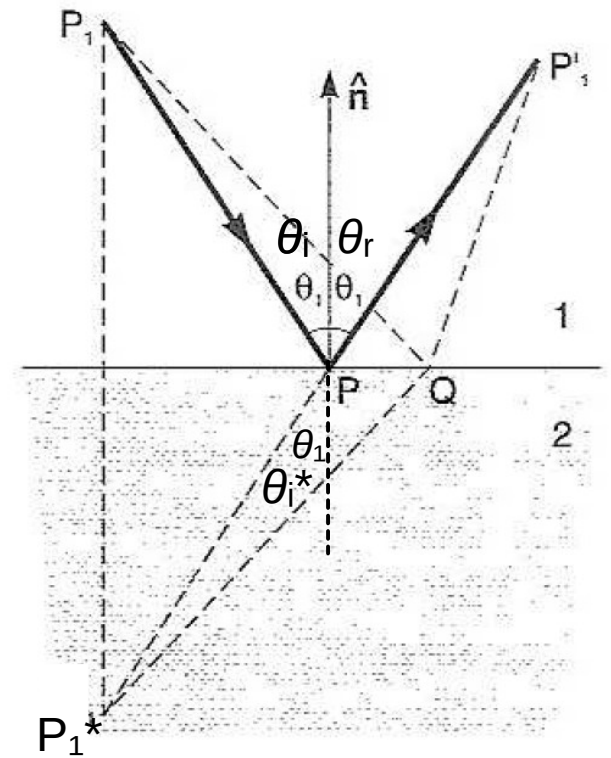
Reflexão e Refração

O Princípio de Fermat

O Princípio de Fermat também pode ser usado para **comprovar a lei da reflexão**:

Definindo como P_1^* o ponto P_1 **espelhado** pelo **plano** da **superfície refletora** pro lado "de trás".

Já que $(n)\overline{P_1P} = (n)\overline{P_1^*P}$,
a posição de P que minimiza $(n)\overline{P_1P}$
também minimiza $(n)\overline{P_1^*PP'_1}$,
que é a interseção da reta $\overline{P_1^*P'_1}$
com a superfície refletora
 $\Rightarrow \theta_i = \theta_i^* = \theta_r$



Reflexão e Refração

O Princípio de Fermat

... e a **Lei de Snell**:

Caminho óptico:

$$l = n_1 \overline{P_1P} + n_2 \overline{PP_2}$$

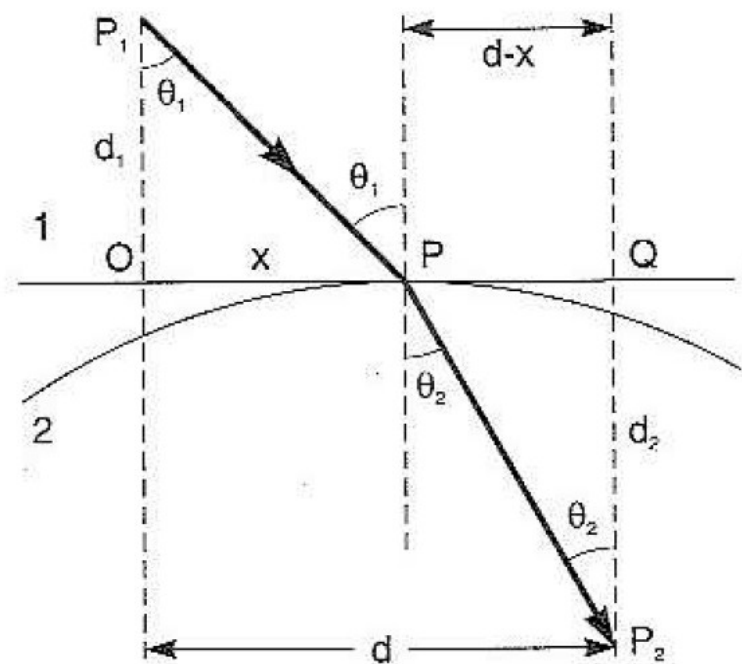
O **parâmetro** que **variaremos** é x ,
então procuramos o x ,
para aquele $dl/dx = 0$:

$$l = n_1 \sqrt{d_1^2 + x^2} + n_2 \sqrt{d_2^2 + (d-x)^2}$$

$$\begin{aligned} \Rightarrow dl/dx &= n_1 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{2x}{\sqrt{d_1^2 + x^2}} + n_2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{2(d-x) \cdot (-1)}{\sqrt{d_2^2 + (d-x)^2}} \\ &= n_1 \cdot \frac{x}{\sqrt{d_1^2 + x^2}} - n_2 \cdot \frac{(d-x)}{\sqrt{d_2^2 + (d-x)^2}} \end{aligned}$$

$$= n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 - n_2 \cdot \text{sen } \theta_2 = 0$$

$$\Rightarrow n_1 \cdot \text{sen } \theta_1 = n_2 \cdot \text{sen } \theta_2$$



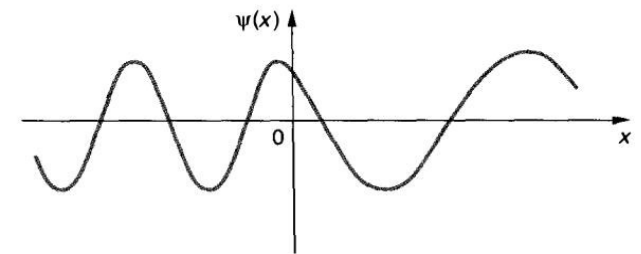
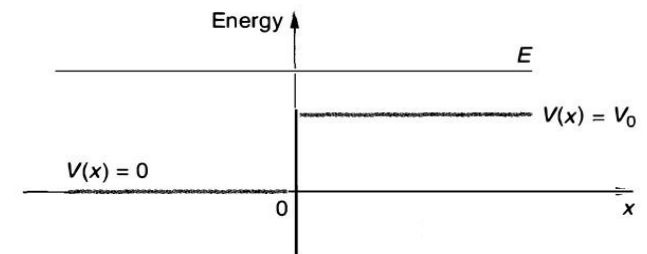
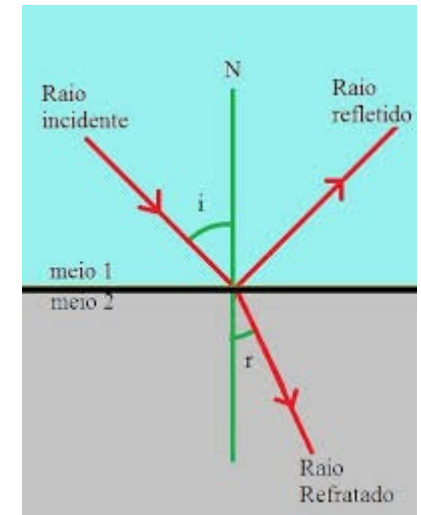
Reflexão e Refração

Normalmente, quando um **raio** chega na **superfície** entre **dois meios**, **parte** é refletida e **parte**, refratada.

Analogia com a Física Quântica

Isto é similar ao problema de **degrau** de **potencial** na **mecânica quântica**, quando a **energia** da partícula/onda é **maior** que a "altura" do **degrau**, $E > V_0$.

(Na disciplina Física Quântica ainda calculamos os coeficientes de reflexão e transmissão R e T .)



Reflexão e Refração

Reflexão Total

Olhando de novo pra **Lei de Snell** e explicitando $\sin \theta_2$:

$$\sin \theta_2 = n_1/n_2 \cdot \sin \theta_1$$

Se $n_1 > n_2$ (por exemplo, se o raio "quer" passar de água ou um vidro pro ar), devem **existir valores** de **ângulos** de **incidência** θ_1 (se o raio vem "roçando" a superfície) para aqueles $\sin \theta_2 > 1$!

Na prática isto significa que **não** haverá **onda refratada**.
=> **Reflexão Total**

Chamamos de **ângulo crítico**, o valor **limite** de θ_1 a partir daquele **não** pode mais haver **refração** ($\sin \theta_2 = 1$):

$$\theta_c = \sin^{-1} n_2/n_1$$

Reflexão e Refração

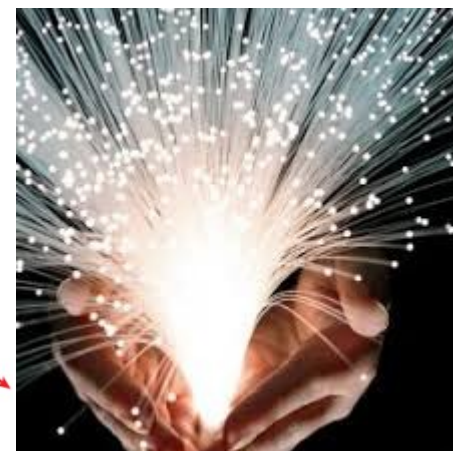
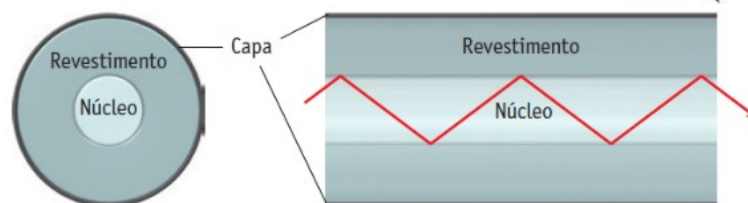
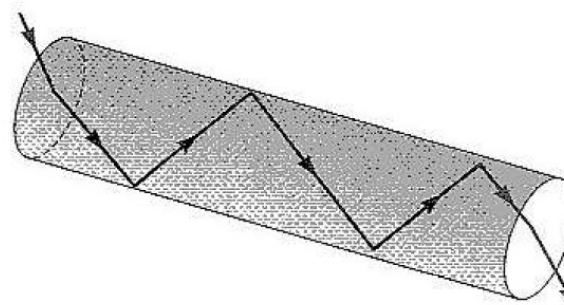
Reflexão Total

Reflexão total faz como que, **visto da água**, a **superfície da água** pode agir como um **espelho**

($\theta_{c, \text{água-ar}} \sim 49^\circ$, nem precisa ser tão "roçando" assim),

e é base do funcionamento de **fibras óticas**

($\theta_{c, \text{vidro-ar}} \sim 42^\circ$),
muito usadas em **telecomunicações**.



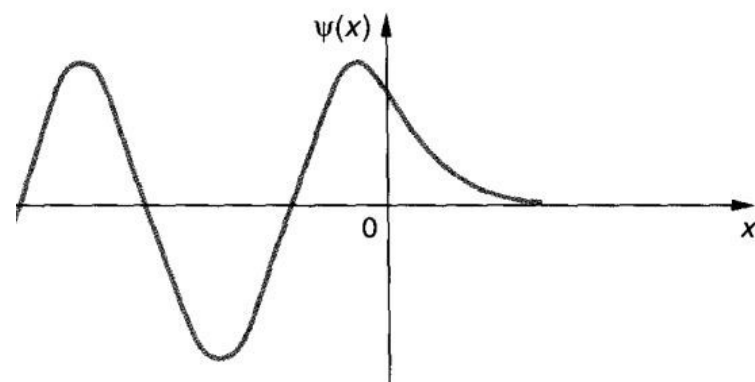
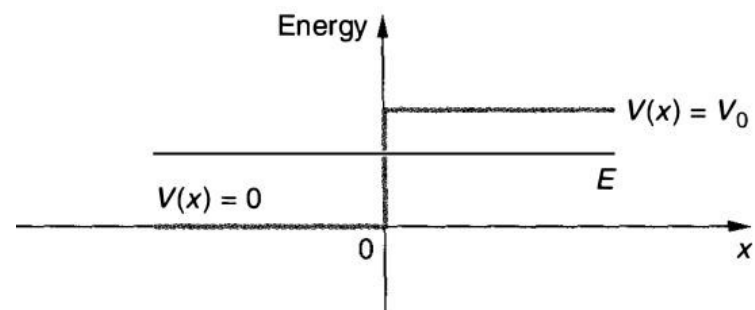
Reflexão e Refração

Reflexão Total

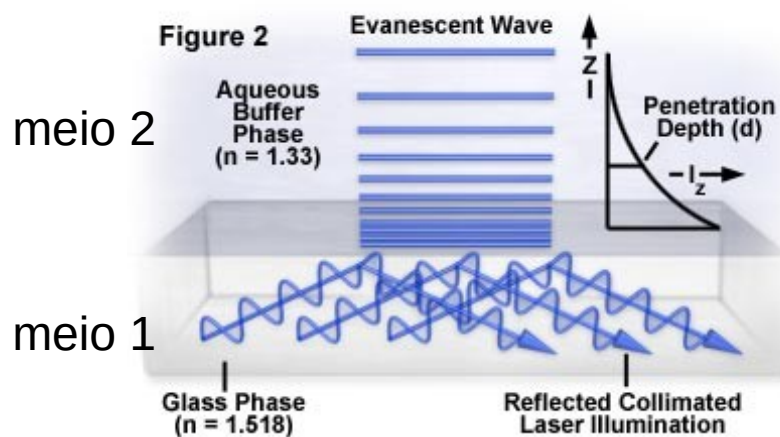
Analogia na física quântica:
potencial degrau com $E < V_0$.

Até pra parte da função de onda
"penetrando na região
classicamente proibida"
temos o **análogo** na **reflexão
total** de luz:

O raio de luz entra um pouco no
meio 2, o que é chamada
onda evanescente.



Evanescent Wave Exponential Intensity Decay



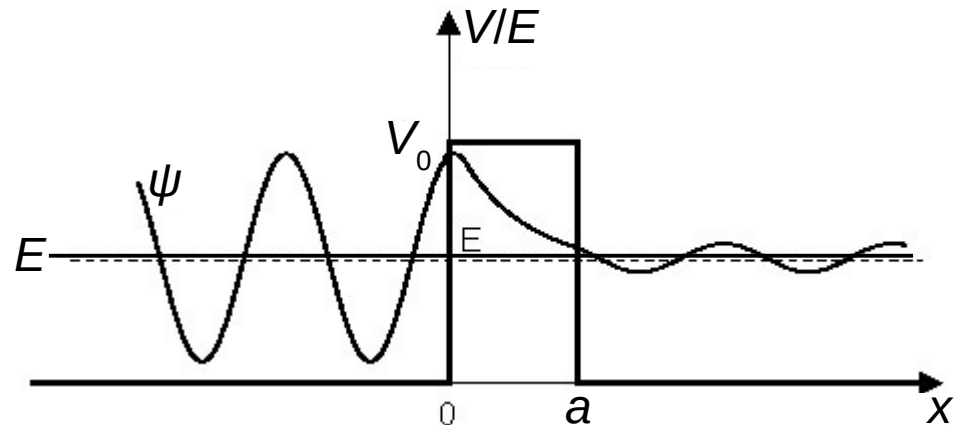
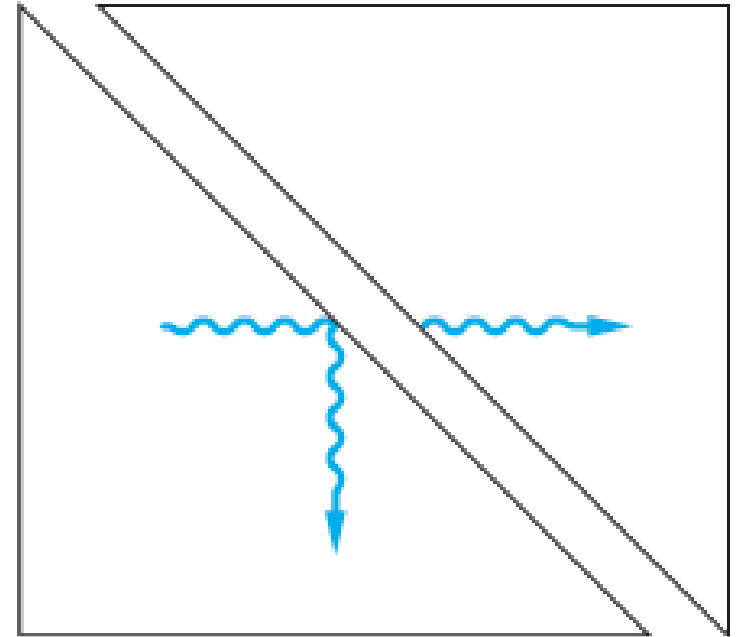
Reflexão e Refração

Reflexão Total Frustrada

Se colocamos **outro elemento óptico** muito **próximo** à **superfície** que fazia reflexão total (basicamente dentro do alcance da onda evanescente), **parte do raio** pode **atravessar** o **meio 2**

(<https://www.youtube.com/watch?v=q7Q8l3xKyr4>),

análogo ao **efeito túnel** ou **tunelamento** na física quântica.



Reflexão e Refração

Imagens de Objetos

Elementos óticos, como lentes e espelhos, podem fazer um objeto aparecer

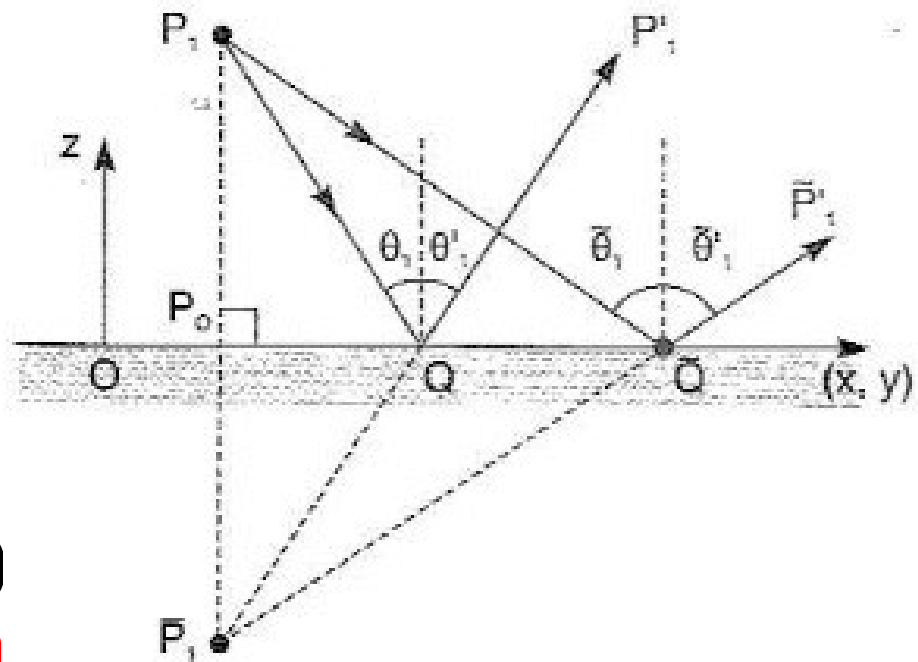
- em outro lugar,
- com outro tamanho,
- deformado e/ou
- em vários lugares (imagens múltiplas).

Boa parte da ótica geométrica trata da relação entre um objeto e sua(s) imagem(s) (ou objeto virtual), em função das propriedades (posição e outras propriedades) dos elementos óticos no caminho da luz do objeto até um observador.

Reflexão e Refração

Espelhos Planos

Pela **Lei da Reflexão**, dá para ver que uma **superfície refletora plana** (espelho) faz um **ponto P_1** (no caso (x, y, z)) **parecer**, como se ele estivesse na **posição \bar{P}_1** (no caso $(x, y, -z)$) que é sua **posição espelhada** pelo **plano do espelho** (no caso, o plano xy).

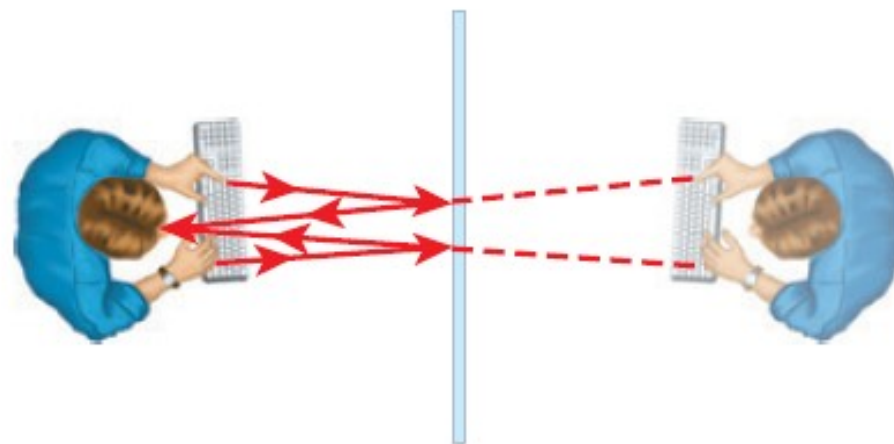
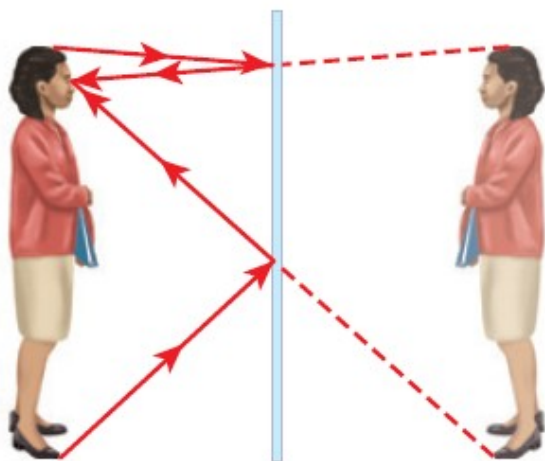


Já que isto vale para **todos** os **pontos** de um **objeto**, vemos ele **inteiro** como se estivesse **espelhado** pelo plano. => A **imagem** de um objeto visto "através" de um **espelho plano** é o **objeto espelhado** pelo plano do espelho.

Reflexão e Refração

Espelhos Planos

Uma **pessoa** na frente de um **espelho** vê uma **imagem virtual** (daquela sai nenhum raio de luz real) de si mesma.



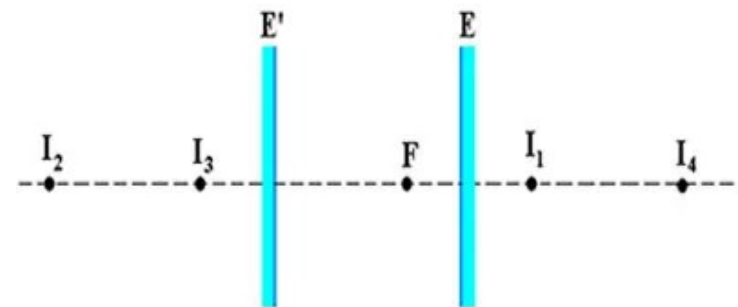
Já que a **imagem virtual** é uma versão **espelhada** do objeto, a **paridade** do seu **sistema de coordenadas** é **invertida**.

Mãos **esquerdas** viram mãos **direitas**, a **quiralidade** de estruturas helicoidais **inverte**, etc.

Reflexão e Refração

Espelhos Planos

Efeitos interessantes podem acontecer **combinando** múltiplos **espelhos**, como entre **dois espelhos paralelos**, ...



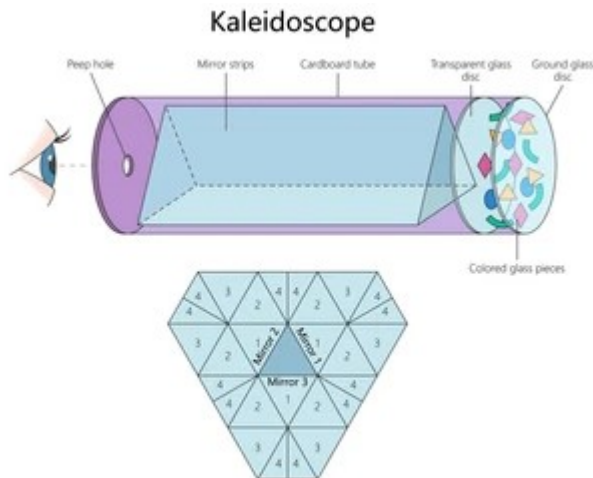
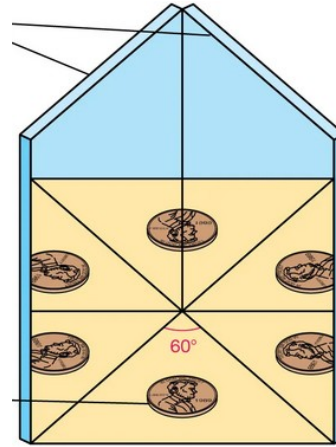
Reflexão e Refração

Espelhos Planos

... dois espelhos
fazendo 60° entre si,

ou 3 (caleidoscópico),

...

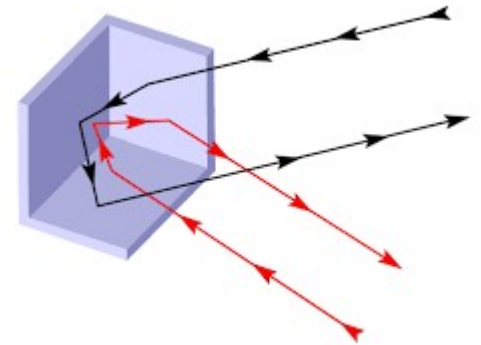


Reflexão e Refração

Espelhos Planos

... ou num **refletor de canto**,
3 espelhos perpendiculares
entre si,
tal que os **raios de luz** são
espelhados de volta, de onde
eles vieram.

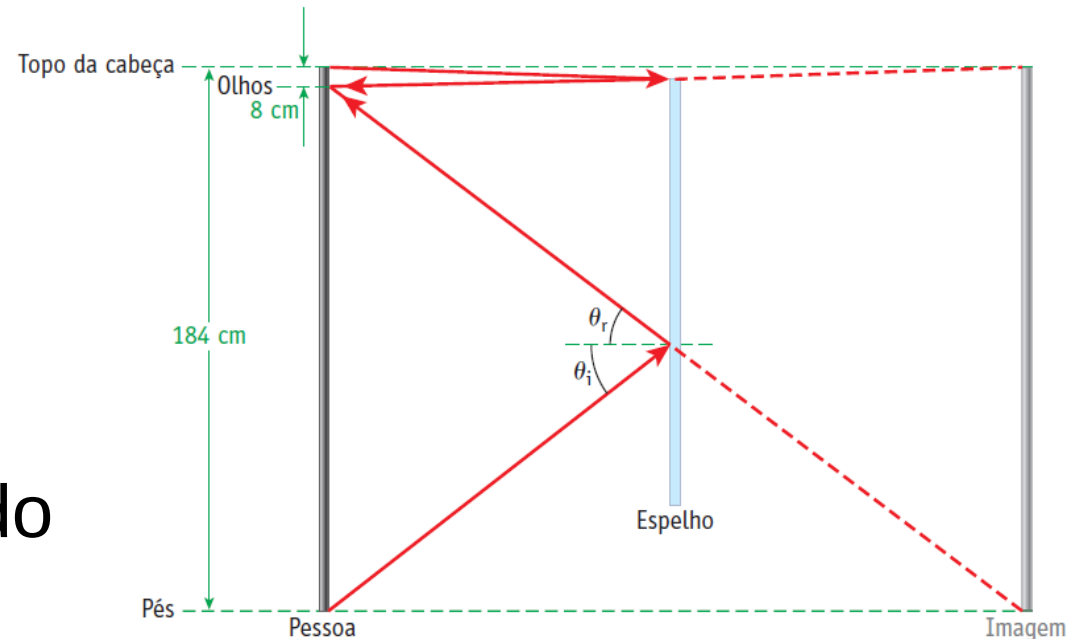
Olhando para um, você vê seu
olho, independentemente de
como você orienta ele.



Reflexão e Refração

Exemplos

Um indivíduo de 1.84 m de altura deseja comprar um **espelho** no qual ele possa **enxergar todo** o seu **corpo**. Seus olhos distam 8 cm do topo de sua cabeça. Qual é a **altura mínima** necessária para o espelho?



Reflexão e Refração

Exemplos

Exemplo 1.4

Luz passando por uma placa

Um feixe de luz passa do meio 1 para o 2, este último uma placa espessa de material cujo índice de refração é n_2 (Fig. 1.13). Mostre que o feixe emergindo no meio 1 do outro lado está paralelo ao feixe incidente.

SOLUÇÃO

Conceitualização Siga o caminho do feixe de luz conforme ele entra e sai da placa de material na Figura 1.13, onde supomos que $n_2 > n_1$. O raio inclina-se em direção à normal ao entrar, e em direção oposta à normal ao sair.

Categorização Determinamos os resultados ao

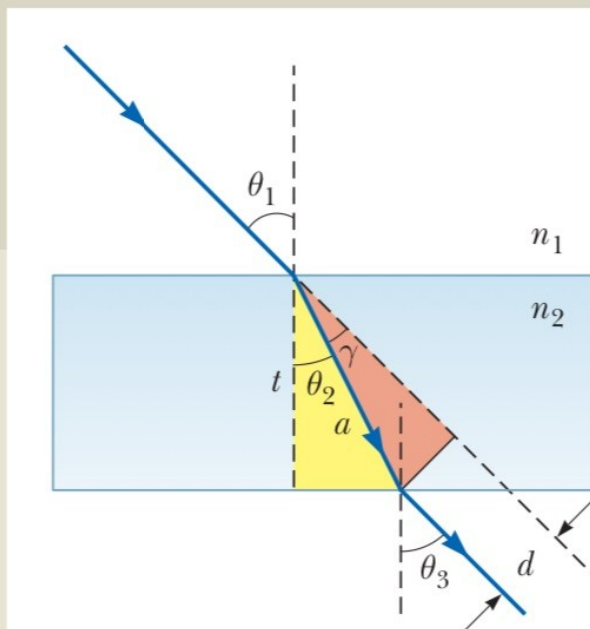


Figura 1.13 (Exemplo 1.4) A linha pontilhada desenhada paralelamente ao raio que sai da parte inferior da placa representa o caminho que a luz percorreria se a placa não estivesse lá.

E SE? E se a espessura da placa for dobrada? A distância de desvio d também dobra?

Reflexão e Refração

Exemplos

Exemplo 2.7

Aquele que escapou

Um pequeno peixe está a uma profundidade d abaixo da superfície de um tanque (Fig. 2.19).

(A) Qual é a profundidade aparente do peixe quando visto diretamente de cima?

SOLUÇÃO

Conceitualização Como $n_1 > n_2$, onde $n_2 = 1,00$ é o índice de refração do ar, os raios originários do peixe na Figura 2.19a são refratados de forma não perpendicular à superfície e divergem para fora.

Categorização Como a superfície refratária é plana, R é infinito. Assim, podemos utilizar a Equação 2.9 para determinar a localização da imagem com $p = d$.

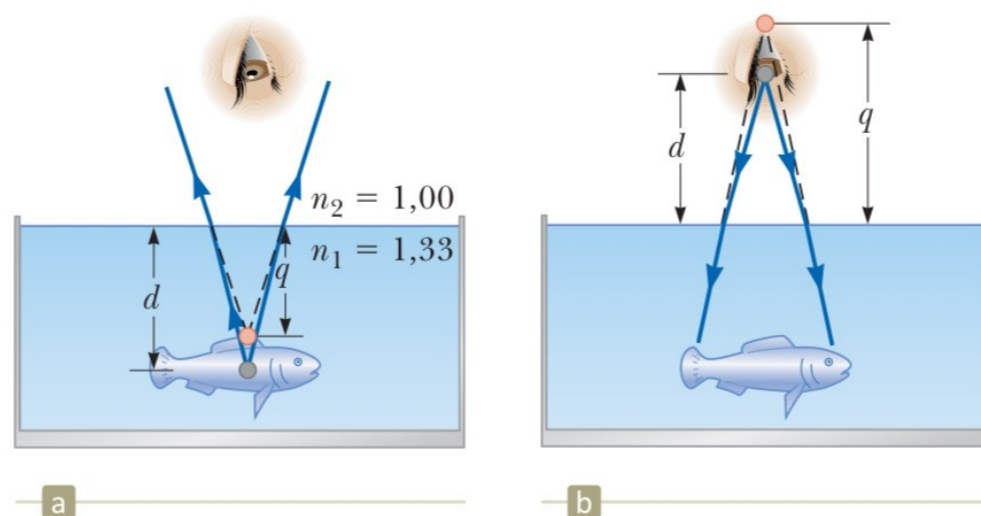


Figura 2.19 (Exemplo 2.7) (a) A profundidade aparente q do peixe é menor que a real d . Supõe-se que todos os raios sejam paraxiais. (b) Para o peixe, seu rosto parece estar mais acima da superfície do que realmente está.

Suponha, que o ângulo, sob aquele o peixe aparece, é pequeno.



Universidade Federal do ABC

Ótica e Relatividade

FIM PRA HOJE

